

中部電力株式会社 浜岡原子力発電所第5号機の建設

Construction of Hamaoka Nuclear Power Station Unit No. 5 of Chubu Electric Power Co., Inc.

梶山 直希 Naoki Kajiyama

柴下 直昭 Naoaki Shibashita



中部電力株式会社浜岡原子力発電所第5号機の全景

浜岡原子力発電所第5号機は、2005年1月に営業運転を開始した。

中部電力株式会社の浜岡原子力発電所第5号機は、60 HzのABWRとしては、わが国の初号機である。1999年3月に第1回工事計画が認可され、安全性、信頼性、経済性のいっそうの向上を目指して着手したこの発電所5号機は、据付け工事と試験が順調に完了し、予定どおり2005年1月に営業運転を開始した。

日立製作所は、タービンと発電機設備一式の建設を担当し、最新の設計技術と建設技術を駆使してこの

発電所の建設を進めてきた。中でも、先行機の同発電所第4号機の技術に改良を重ねた高効率蒸気タービンや大容量発電機は、わが国最大の電気出力(1,380 MW)の達成に大きく貢献した。また、建設工事では、大ブロック・モジュール工法の拡大や、高度化三次元CADシステムを活用した各種の建設工法・現地建設支援技術を適用し、現地作業の効率向上や安全性、品質の向上を図った。

1 はじめに

中部電力株式会社の浜岡原子力発電所第5号機〔ABWR

(改良型沸騰水型原子炉)、電気出力1,380 MW〕(以下、浜岡5号機と言う。)が完成し、2005年1月に営業運転を開始した。

この浜岡5号機は、最新の技術を駆使した原子力発電所

であり、電気出力はわが国最大となる。日立製作所は、このタービン発電機設備一式を担当した。

ここでは、浜岡5号機として特徴的な製品である高効率蒸気タービンと大容量発電機の技術、および建設工程と建設に適用した最新の技術について述べる。

2 高効率蒸気タービン

浜岡5号機向け蒸気タービンは、ABWR用蒸気タービンとしては日立製作所の初号機であり、最大容量機となる。先行機である浜岡4号機(1,137 MW)と比較し、その特徴について以下に述べる。

2.1 蒸気タービンの構造

浜岡4号機との基本諸元比較を表1に示す。

出力が1,380 MWの浜岡5号機では、浜岡4号機よりも排気流量が増加するため、最終段動翼を従来の43インチ(約109 cm)に代えて、52インチ(約132 cm)長翼を採用した。

これにより、車室数を増やすことなく、浜岡4号機と同じ高圧1車室、低圧3車室の計4車室の構造を可能としている。こ



図1 蒸気タービンの全景

浜岡5号機向け蒸気タービンは、据付けと試運転を経て、順調に運転中である。

表1 基本諸元比較

先行機である浜岡4号機と浜岡5号機との基本諸元を比較して示す。

項 目		5号機	4号機
出力 (MW)		1,380	1,137
型式		TC6F-52	TC6F-43
主蒸気温度 (°C)		283.7	282.3
主蒸気圧力 (MPa・a)		6.79	6.65
主蒸気流量 (t/h)		約7,300	約6,100
回転速度 (min ⁻¹)		1,800	1,800
段落数	高圧	7段×2流	6段×2流
	低圧	7段×6流	8段×6流
最終段動翼長 [インチ(cm)]		52(約132)	43(約109)
車室数	高圧	1	1
	低圧	3	3
全長 (m)		約49	約45
抽気段数	高圧	2段	2段
	低圧	4段	4段



図2 低圧タービンロータ

52インチ(約132 cm)最終段動翼を採用した低圧タービンロータの外観を示す。

の52インチ長翼は、1985年に試作、開発したもので、実機への適用は浜岡5号機が初めてとなる。

各車室寸法は、蒸気流量が増加するため、先行機よりも大きくしており、特に低圧車室は52インチ最終段動翼に最適な排気口面積を確保するよう考慮した。

また、この蒸気タービンでは、近年のロータ素材製造技術の向上を反映させ、従来標準で行ってきたロータ中心孔のせん孔、焼鈍、および熱安定試験を省略し、仕様の適正化を図った。

2.2 蒸気タービンの性能向上

この蒸気タービンでは、浜岡4号機よりもさらに性能向上を図るため、静翼と動翼に新技術を採用している。

その中の代表的な技術の一つは、AVN(Advanced Vortex Nozzle)である。

AVNを適用することにより、静翼の翼長方向に湾曲させ、腹側を凸状に形成することができるため、二次流れなどによる流れの不均一性を緩和することができる(図3参照)。

また、この構造により、静翼で発生する損失を低減し、蒸気タービンの内部効率を向上させることができた。この蒸気タービンでは、高圧と低圧の全静翼にこのAVNを採用している。

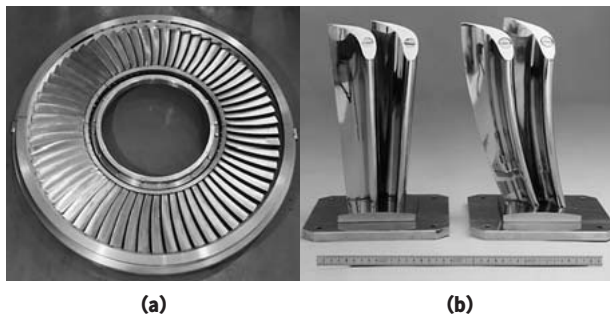


図3 AVNの外観(a)と形状比較(b)

AVN(Advanced Vortex Nozzle)は、蒸気タービン性能向上策の一つとして大きく寄与している。(b)の写真のうち、左は従来静翼、右がAVNを適用したものである。

3 大容量発電機

浜岡5号機の1,570 MVAタービン発電機は、現在、単機容量としてはわが国最大級のものである。

このタービン発電機の設計方針と技術課題、および適用技術について以下に述べる。

3.1 設計方針

大容量発電機の主な仕様比較を表2に示す。1,570 MVA発電機は、実績のある50 Hz、1,300 MVA機とほぼ同じ寸法ながら、周波数を1.2倍の60 Hzに上げることで、容量も1.2倍に増やすことができる。また、冷却については、回転数の増加による冷却ガス風量の増加効果や固定子冷却水流量の増加により、巻線温度上昇を従来レベルに抑えられることが確認できた。

3.2 技術課題と適用技術

大容量化に伴う技術課題と、それに対する適用技術を表3に示す。このうち、代表的な二つの適用技術について以下に述べる。

3.2.1 水冷却固定子巻線

固定子巻線は、中空素線と中実素線の混合素線とするこ

表2 大容量発電機の仕様比較

実績のある50 Hz、1,300 MVA機に対して、周波数を1.2倍の60 Hzに上げることで、容量を1.2倍に増やすことができる。

項目	1,570 MVA機	1,300 MVA機	1,280 MVA機
出力(MW)	1,380	1,100	1,137
周波数(Hz)	60	50	60
力率	0.9	0.9	0.9
電圧(kV)	22	19	22
電流(kA)	41.2	39.5	33.5
回転速度(min ⁻¹)	1,800	1,500	1,800

表3 技術課題と適用技術

大容量化(大電流化、大型化)に伴う技術的課題を克服するため、1,570 MVA発電機には各種の技術を適用している。

技術課題		適用技術
大電流化	固定子巻線冷却	混合素線異断面巻線 水-電気一体接続構造 大径絶縁ホース
	固定子巻線端部支持構造	テトラロック構造
	固定子鉄心端部構造	シールドコア、銅板シールド
	回転子巻線冷却	直接冷却界磁リード
	口出しプッシング	水素直接冷却プッシング
大型化	回転子振動	振動応答感度の低減
	回転子軸材料	高強度・高靱性軸材
	エンドリング材料	高強度18 Mn-18 Cr鋼
	回転子ファン	溶接式ラジアルファン
	回転子断面形状	最適化設計による応力低減
	固定子フレーム	コンパクトフレーム 球形ターミナルボックス
	大口径軸受	上射溝付きだ円軸受



図4 完成した1,570 MVA発電機の外観

完成した浜岡5号機の大容量発電機は、良好な現地試運転結果を経て運転中である。

とで、コイルの高さ寸法を抑えている。また、素線寸法が上底で異なる異断面コイルを採用することにより、発生損失を低減させている。同時に、上底コイルシリーズ接続部には水で直接冷却する水-電気一体型構造を採用し、冷却効果の向上を図っている。また、固定子冷却水の増加には、大口径絶縁ホースを採用することで対応した。

3.2.2 固定子鉄心端部

電機子電流の増加に伴い、端部漏れ磁束が増加するので、鉄心端部の過熱が問題となる。そのため、鉄心端部磁界解析を行い、シールドコアや銅板シールドを採用するなど、端部構造の最適化を図った。

完成した1,570 MVAタービン発電機の外観を図4に示す。この発電機の完成により、今後の大容量機の設計・製作の土台を築くことができた。

4 最新建設技術

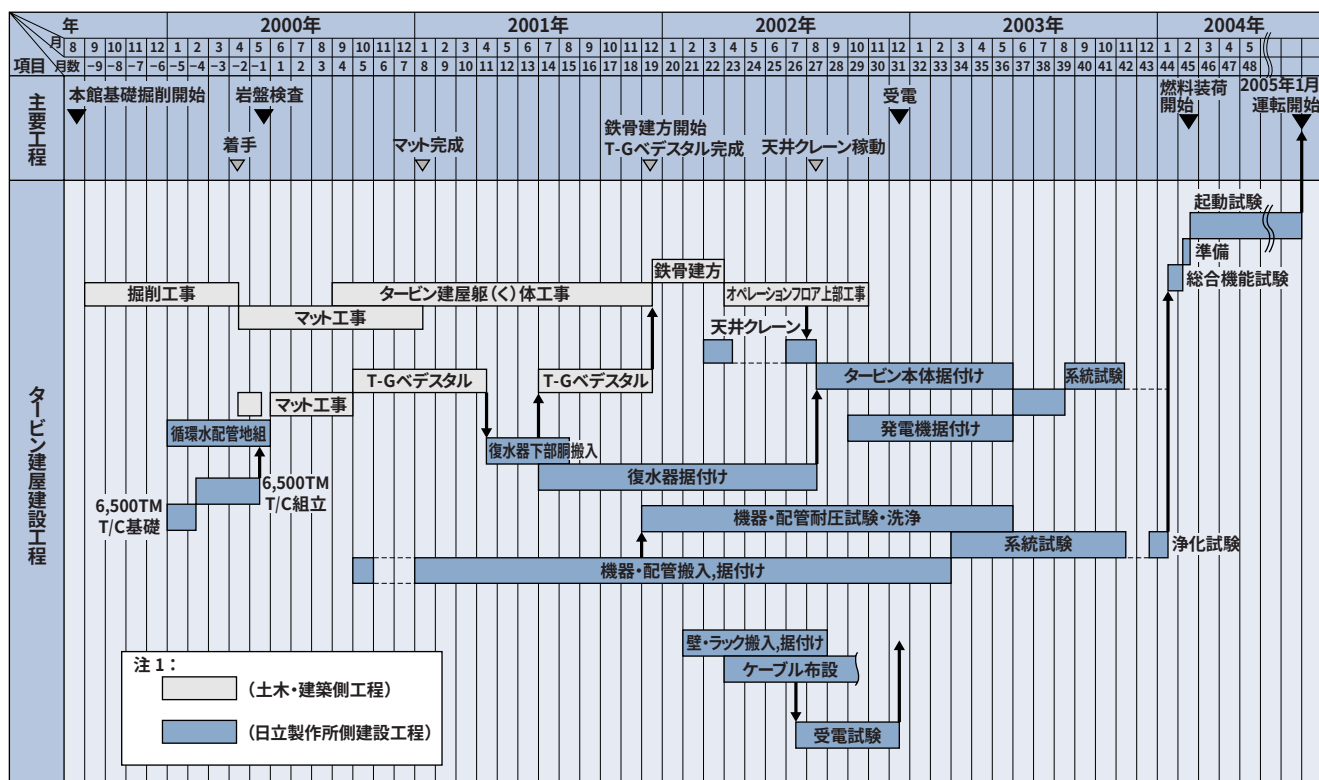
4.1 建設工程

浜岡5号機の建設は、1999年3月19日に着工し、同年8月に本館基礎掘削を開始し、2005年1月に営業運転を開始した。運転開始まで65か月、2000年5月に岩盤検査を開始してから運転開始までが56か月という工程で、予定どおりに建設を完了した。この建設工事の実績工程を図5に示す。

4.2 建設工法と適用技術

浜岡5号機の建設では、日立製作所が先行機から適用している大ブロック・モジュール工法を機軸とするさまざまな工法を改善し、三次元CAD(Computer-Aided Design)システムや高速ネットワークなどの情報技術を駆使した建設支援技術により、安全性と品質を確保しながら建設工期の確保と工事の合理化を達成した。

具体的には、(1) モジュール工法の適用拡大、(2) 機器・



注2：略語説明 T-G(Turbine Generator)，TM(ton×meter)，T/C(Tower Crane)

図5 浜岡5号機のタービン建屋主要工事工程

建屋工事を行う建築工事工程(土木・建築側工程)と、機械品や電気品などの機器の据付け・試験を行う機電工事工程(日立製作所側建設工程)の実績を示す。

配管類の先入れ拡大と、建築工事・機電工事の併進化，(3) 階層別工法の適用，(4) 情報技術活用による建設管理の四つの手法を適用した。これらの手法の概要について以下に述べる。

(1) モジュール工法の適用拡大

現地の作業量削減と作業効率向上などを目的に，設計・生産システムとインフラストラクチャーの改善により，これまで実施してきたモジュール工法を飛躍的に拡大，高度化した。このモジュール技術については5章で述べる。

(2) 機器・配管類の先入れ拡大と，建築工事・機電工事の併進化

先入れ製品の範囲・物量を拡大するとともに，エリア引き渡し前の建築工程の期間中に，機器や盤・ラック基礎の設定，操作架台設定など，従来はエリア引き渡し後に行っていた作業を先行させ，作業の前倒しや作業手順の最適化による効率向上を達成した。

(3) 階層別工法の適用

従来の配管工事は，建屋上階まで工事が完了してから系統耐圧試験を行っていた。そのため，建設工事の終盤に配管耐圧試験が重なり，その後に行う保温，塗装，穴じまいといった付帯作業や足場解体作業もあって，作業量に大きなピークが発生していた。そのため，地下階に配置されている系統や，階層別に分割耐圧試験の実施が比較的容易な系統を抽出して分割耐圧試験を実施した。その結果，効率的

に作業を消化し，作業ピークの抑制を可能にした。

(4) 情報技術活用による建設管理

前述のさまざまな工法を適用し，確実に実施していくためには，高度な建設計画や建設管理が必要であり，それらを精度よく効率的に行うことがきわめて重要である。そのために，建設会社との協業による各種シミュレーションの実行や，現地建設管理の効率的遂行のためのツールを開発，改良し，浜岡5号機の建設に適用した。これらの建設支援技術については，6章で述べる。

5 大ブロック・モジュール工法の拡大

5.1 大ブロック・モジュール工法適用の拡大

日立製作所は，1980年代の初頭から世界に先駆けて原子力プラント建設でモジュール工法を採用し，その適用を拡大してきた。モジュール工法は，従来個々に据え付けられる機器，配管，バルブ，操作架台などを，事前に工場または現地ヤードで組み立て，大型揚重機を用いて搬入，据え付ける工法である。この工法の採用により，幅輻(ふくそう)したエリアの据付け作業の簡素化や据付け期間の短縮，現地作業量の低減が可能となるほか，現地作業全体の平準化や品質・安全性の向上など，多くの利点を享受できた。

日立製作所は，このモジュール化技術を独自に発展させ，

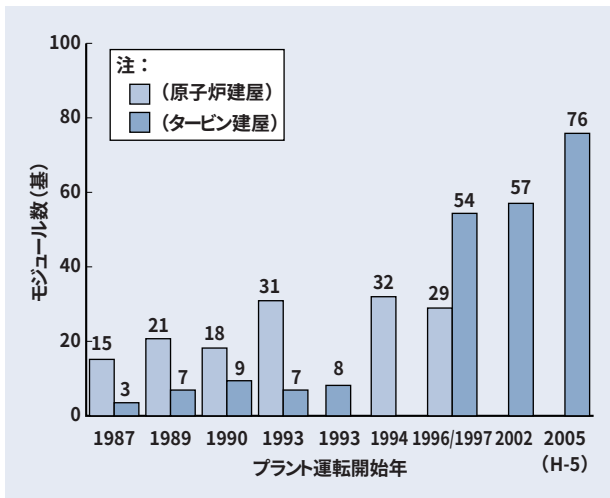


図6 モジュール基数の変遷

建設プラントへのモジュール基数の変遷を示す。2005年のH-5は、浜岡5号機の実績である。

プラント統合CAE(Computer-Aided Engineering)システムの発展やモジュール組立専用工場を設立した。これにより、さらに高度なモジュール技術を完成させ、浜岡5号機建設に適用した。

浜岡5号機とそれまでの建設プラントの適用モジュール基数

の変遷を図6に、適用した代表的なモジュールを図7にそれぞれ示す。

このモジュール工法と4章で述べた先入れ・併進化工法の適用拡大により、先行の同出力タービン建屋の建設に比べ、現地作業のピークを約20%低減できたほか、現地据付け作業の高効率化、安全性と作業品質の向上を達成できた。

6 建設支援技術

浜岡5号機には三次元CADシステムを全面的に取り入れた設計がなされており、下流側である建設でもその情報を有効に活用し、最新の情報技術を採用しながら、前述した各種建設技術や高効率な建設の遂行を支援してきた。その代表的な内容について以下に述べる。

6.1 建設会社との協業

発電所の建設では、初期段階から建設会社と建設工法や工程について協力しながら計画を立案し、相互の計画の整合性を確認することが重要である。浜岡5号機では、相互の三次元CADデータを共通のフォーマットに変換して、全体工

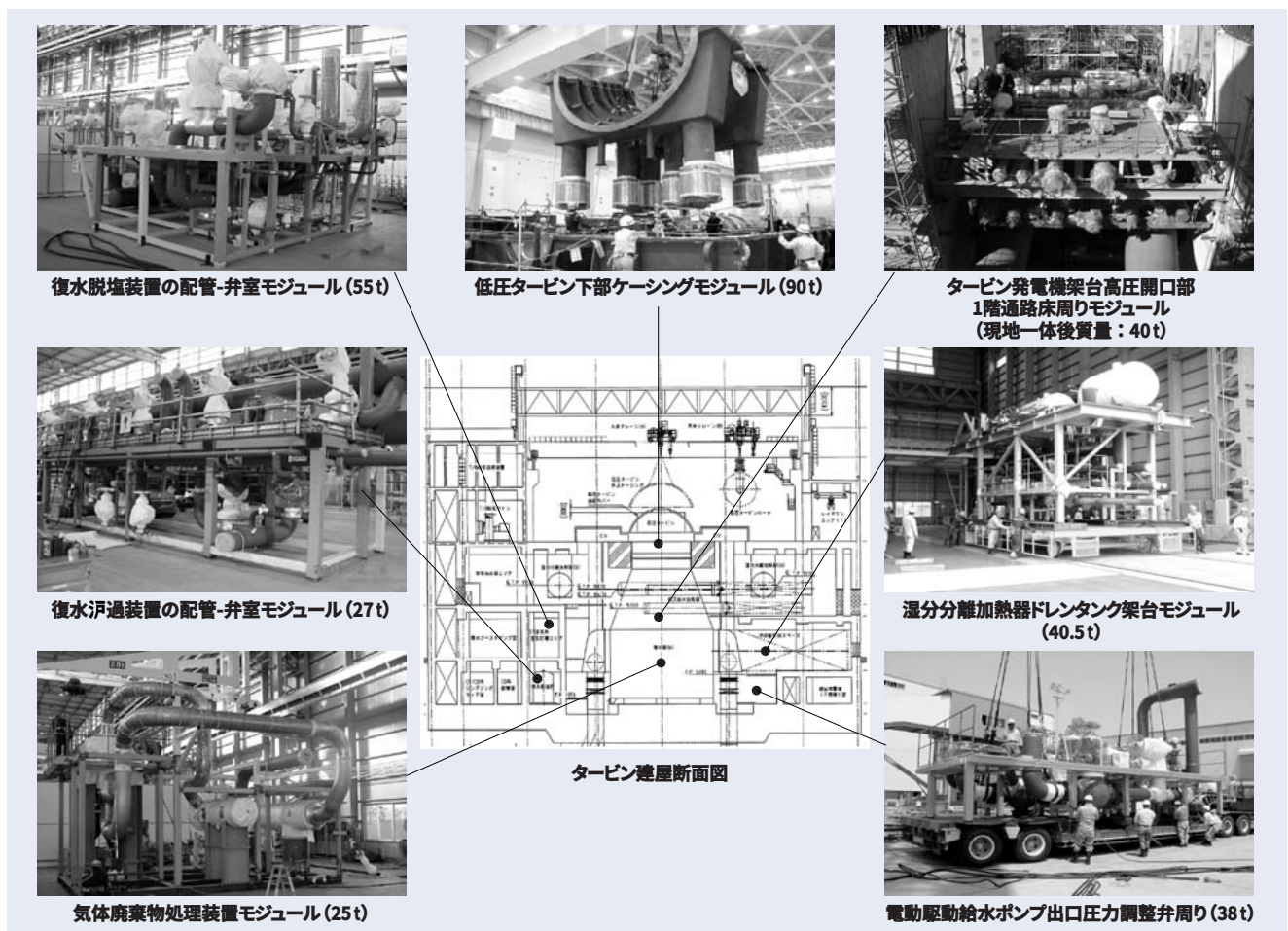


図7 浜岡5号機タービン建屋に適用した代表的モジュール

浜岡5号機タービン建屋内に適用した大ブロック・モジュール工法の例を示す。

程と部分工程のシミュレーションを実施した。全体工程シミュレーションの一部を図8に示す。このシミュレーションでは施工過程をビジュアルに確認することができ、整合の取れた精度の高い計画を実現することができた。

また、部分工程シミュレーションの例である機器搬入計画の例を図9に示す。このシミュレーションにより、作業実施前に搬入状況を確認することができ、工事の手戻りやむだを省くことができた。また、現場の月間、週間工程表を電子データで交換することにより、入力作業の重複削減、情報伝達の円滑化など、間接業務の合理化を図ることができた。

6.2 情報技術活用による建設管理

日立製作所の事業所と現場詰め所を含む建設所はネットワークで結ばれており、各種設計データや製作データをオンラインで検索できる環境を構築している。さらに、現地建設システムを開発して導入し、現地管理に必要な工程計画システムや作業指示システムなど七つのサブシステムを運用した。これらのシステムの稼動状況や実績データは事業所でも確認できるため、現地進捗(ちよく)状況に合致したエンジニアリング管理にも寄与し、現地の各種間接業務の高効率化と的確な作業計画の実現を可能とした。

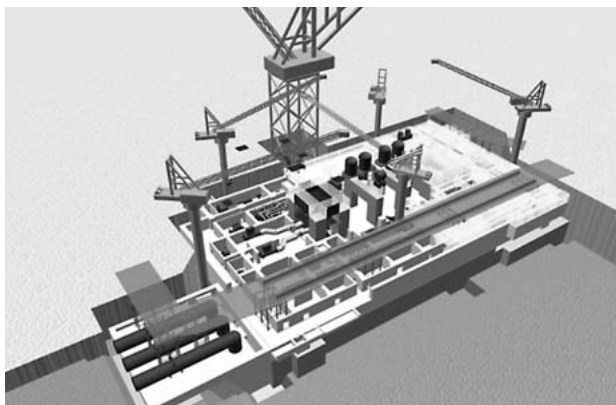


図8 浜岡5号機タービン建屋の全体工程シミュレーション
数か月後の建設状況(施工過程)をシミュレートした例を示す。

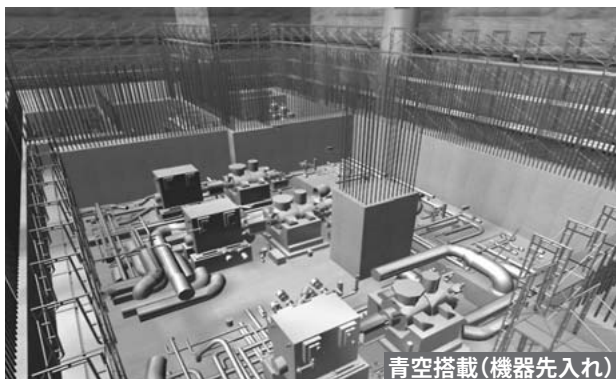


図9 部分工程のシミュレーション
ポンプ室の機器搬入計画(躯体工事・機器搬入手順)をシミュレートした例を示す。

7 おわりに

ここでは、中部電力株式会社浜岡原子力発電所5号機で日立製作所が担当した高効率蒸気タービンと大容量発電機の技術、および建設工程と最新の建設技術について述べた。

設計、建設の各分野で最新の技術・工法を適用した浜岡5号機は、60 Hz初のABWRとして建設が進められ、わが国の原子力発電所では最大の電気出力を作り出す発電所として完成した。

日立製作所は、今後も原子力発電における蒸気タービンや大容量発電機の技術開発を進めるとともに、建設工事でも最新の技術を開発し、作業効率や安全性の向上を図っていく考えである。

参考文献

- 1) 柏原克人, 外: 高性能・高信頼性蒸気タービン長翼の開発, 日本機械学会講演論文集 No. 870-10(1987.11)
- 2) 古賀智茂: 1,570 MVAタービン発電機製作完成, 電気学会, RM-03-26(2003年)
- 3) T. Inoue, et al.: Hitachi's Experience and Achievements in ABWR Construction, GENES4/ANP2003(Sept. 2003)

執筆者紹介



梶山 直希

1984年日立製作所入社, 電力グループ 原子力事業部 原子力プロジェクト部 所属
現在, 建設プラントのプロジェクト業務に従事
E-mail: naoki_kajiyama @ pis. hitachi. co. jp



川畑 淳一

1980年日立製作所入社, 電力グループ 原子力事業部 原子力プラント部 所属
現在, 建設プラントの設計・建設, 既設プラントの予防保全設計に従事
日本機械学会会員
E-mail: junichi_kawahata @ pis. hitachi. co. jp



柴下 直昭

1980年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 タービン設計部 所属
現在, 蒸気およびガスタービン本体の設計に従事
日本機械学会会員
E-mail: naoaki_shibashita @ pis. hitachi. co. jp



塩原 亮一

1980年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 電力設計部 所属
現在, 大型発電機の設計業務に従事
電気学会会員
E-mail: ryoichi-shiobara @ pis. hitachi. co. jp